

多应用场景下脑机接口热点伦理问题研究

郑沅瑞, 夏 婷

(中国科协创新战略研究院, 北京 100038)

摘 要: 作为变革性的人机交互技术, 脑机接口正成为全球主要大国竞相布局的未来产业和科技竞争的战略高地之一。我国“十四五”规划中将脑科学与类脑研究列为国家战略科技领域, 大力推动脑机接口技术领域攻关与成果转化。为更好地把握该项技术的发展与应用, 识别预测脑机接口应用的伦理风险, 加强脑机接口的伦理治理, 促进科技向善, 研究开展多应用场景下脑机接口热点伦理问题的调研访谈, 并基于调研访谈结果, 全面梳理不同应用场景下脑机接口热点伦理问题: 治疗型脑机接口主要涉及安全性与有效性、知情同意等问题; 服务型脑机接口主要涉及人格同一性和自我真实性、决策自主权及脑隐私等伦理问题; 增强型脑机接口主要涉及责任分配、社会公平等问题。针对以上热点伦理问题, 研究提出相关治理建议。

关键词: 脑机接口; 技术应用; 科技伦理; 科技治理

1 引言

脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI) 是指在人或动物大脑与外部设备之间创建信息通道, 读取大脑信号并将信号解码后的命令传输到外部设备中, 从而实现脑与设备信息交换的新型交叉技术^[1, 2]。作为变革性的人机交互技术, 脑机接口正在成为全球主要大国竞相布局的未来产业和科技竞争的战略高地之一。自 2013 年以来, 美国启动“推进创新神经技术脑研究计划”(简称“脑计划”), 长期给予立项和资金支持; 欧盟将脑机接口发展列为三大未来和新兴技术旗舰计划之一, 不断完善“人脑计划”的发展路线图。中国虽起步较晚, 但 2016 年的《“十三五”规划纲要》将“脑科学与类脑研究”列为“国家重大科技创

新和工程项目”, 后续“十四五”规划更是将脑科学与类脑研究列为国家战略科技领域。2024 年的两会, 又进一步把脑机接口定位为“新质生产力”的一大方向, 脑机接口的发展成为改善民生健康的重要力量。

当前, 在神经系统疾病方面的医学领域, 脑机接口技术已展现出巨大的应用潜力, 能够帮助患有不完全性和完全闭锁综合征的人实现正常交流^[3, 4], 极大地增进了人类的健康福祉。在非医学领域, 脑机接口技术也已实现控制建筑机器人^[1]、四轴飞行器^[5]、家用智能电器^[6]等功能。然而, 随着脑机信号采集侵入程度的加深, 脑机接口技术应用的安全风险也逐渐增大, 功效的不确定性也越来越高。这些风险包括传感器植入期

作者简介: 郑沅瑞, 中国科协创新战略研究院, 博士后, 研究方向为科技政策评估、创新战略。

夏 婷, 中国科协创新战略研究院, 副研究员, 创新环境研究所副所长, 研究方向为科技组织、科技治理。

间和之后不可逆的脑损伤^[7]，以及用户对脑机接口应用功效不切实际的期望^[8]。而从现有的应用实践和产业规模来看，目前脑机接口市场尚处于早期阶段，产业规模不清晰，产品合规性有待商榷，商业化落地较为困难。因此，如何有效及时地开展脑机接口伦理治理，成为这一技术应用安全落地的重要问题。

2 研究综述

关于脑机接口的科技治理研究，学术界主要围绕脑机接口面临的伦理问题及相关争议展开，已逐步形成了六方面主要问题。

一是最为广泛讨论的脑机接口安全风险，肖峰^[9,10]、顾心怡和陈少峰^[11]、周程^[12]、李超等^[13]认为脑机接口应该坚持“无害”原则，必须将安全风险的考量置于首位，即脑机接口最首要的伦理问题是安全上的风险，是否会对人的健康带来伤害。

二是连续性、同一性问题，杨庆峰^[14]、杨雨和王国豫^[15]指出脑机接口技术能够修复与增强肢体功能，却带来了技术中断的问题，即导致了个体同一性的中断，对人格、同一性、能动性、自主性、本真性和自我产生影响的不确定性问题。

三是知情同意权的保障问题，这一问题多聚焦临床医疗领域脑机接口应用的讨论，崔中良和朱晨恩^[16]、张晟婕等^[17]、陶应时等^[18]认为治疗型脑机接口在给患者带来健康福音的同时，也带来了知情同意的难题，在充分告知、准确理解及自主决策等阶段都存在不同程度的困境。

四是责任归属问题，张志领和王高峰^[19]从算法伦理的视角下分析了脑机接口责任归属的伦理问题；张喆等^[20]从BCI研发人员的角度研究和讨论了以用户为中心和以不危害他人及社会为前提的BCI技术伦理规范，并在之后从个性化植入式BCI治疗、多学科协作的植入式BCI临床应用、负责任地使用植入式BCI等方面研究植入式BCI医学应用伦理规范^[14]。

五是脑隐私保护问题，王高峰等^[21, 22]认为脑机接口隐私风险面临着“脑控”“读脑”“控脑”三方面威胁，并指出目前没有其他技术可以像脑机接口技术那样获得主观意愿与神经状态。

六是社会公平问题，叶岸滔^[23]、张学义等^[24]、李佩瑄和薛贵^[25]指出，考虑到脑机接口的价格、技术控制、市场管控等原因，脑机接口可能在一段时间内只能被少数人使用，导致社会地位和收入较高的群体占据优势，进一步加大人与人之间的不平等性。

然而，上述关于脑机接口伦理问题的讨论虽已具备多元化视角，但从研究方法上，大多数研究仅通过讨论或根据经验主义来阐述脑机接口在应用中存在的科技伦理问题，缺乏结合应用场景下的科学有效的评估方法以及神经伦理学的内容分析；从研究内容上，探究脑机接口伦理仅是初步回答了脑机接口需要治理什么问题，怎么治理，以及相关治理难点等仍需进一步探究。本文将基于脑机接口的发展应用及其特点，通过实地调研和专家访谈，收集实践中的真实数据，全面梳理不同应用场景下脑机接口热点伦理问题，并提出相关伦理治理建议。

3 脑机接口的应用发展现状

3.1 脑机接口技术的发展现状

从德国精神科医生Hans Berger发现 α 波、 β 波脑电波作为BCI技术雏形以来，BCI技术发展至今已接近100年，正在从实验室科研走向临床应用，以医疗领域脑机接口专利申请趋势为例，全球脑机接口技术创新正在稳步发展。本文使用incompat全球专利数据库，使用如下检索式：

ALL=(“脑机接口” OR “脑活动调控” OR “神经界面” OR “神经信号解码” OR “神经电极” OR “brain computer interface” OR “brain machine interface” OR “neural electrode” OR “Brain activity regulation” OR “neural interface” OR “neural signal decoding” OR ((“电极植入” OR

“Electrode implantation”) AND (“颅” OR “脑” OR “头” OR “cranium” OR “brain” OR “head”))) 并将专利申请年份限定为 2006 至 2024 年，共检索出 9520 项专利。

本文重点统计分析中国、美国、欧洲专利局这三大世界主要专利授权主体针对脑机接口发明型专利的申请和授权情况，图 1 和图 2 分别展示了脑机接口领域的相关发明专利的申请和授权的情况。

对比分析来看，中国的脑机接口专利数量在 2015 年左右超过美国，之后持续增长，而美国的脑机接口专利数量在 2020 年后开始下降，欧洲则一直处于较低水平。以 2015 年中国专利数量历史性超越美国为分水岭，可将脑机接口领域技术发

展趋势分为技术跟跑和创新赶超两个阶段。具体来看，第一阶段从 2006 年至 2014 年，无论是脑机接口发明专利的申请还是授权数量，美国均处于领先地位，发明专利申请量从 2006 年的 18 件平稳增长至 2014 年的 68 件，发明专利授权量从 2006 年的 9 件升至 49 件，而中国脑机接口发明专利申请和授权数量在这一阶段则保持较低的水平，年均专利申请量为 23 件左右，年均专利授权量为 16 件左右。这与各国重视脑机接口发展的程度有关，美国国防高级研究计划局 2006 年实施“革命性假肢”项目，高度重视脑机接口的发展与应用，而中国则是迟至 2016 年，才开始从国家战略规划层面重视“脑科学与类脑研究”，并

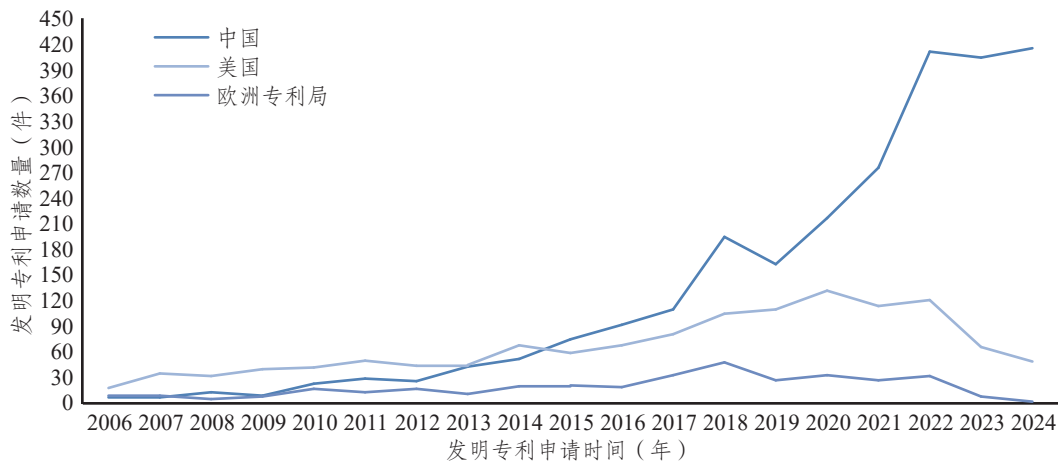


图 1 脑机接口领域相关发明专利的申请趋势

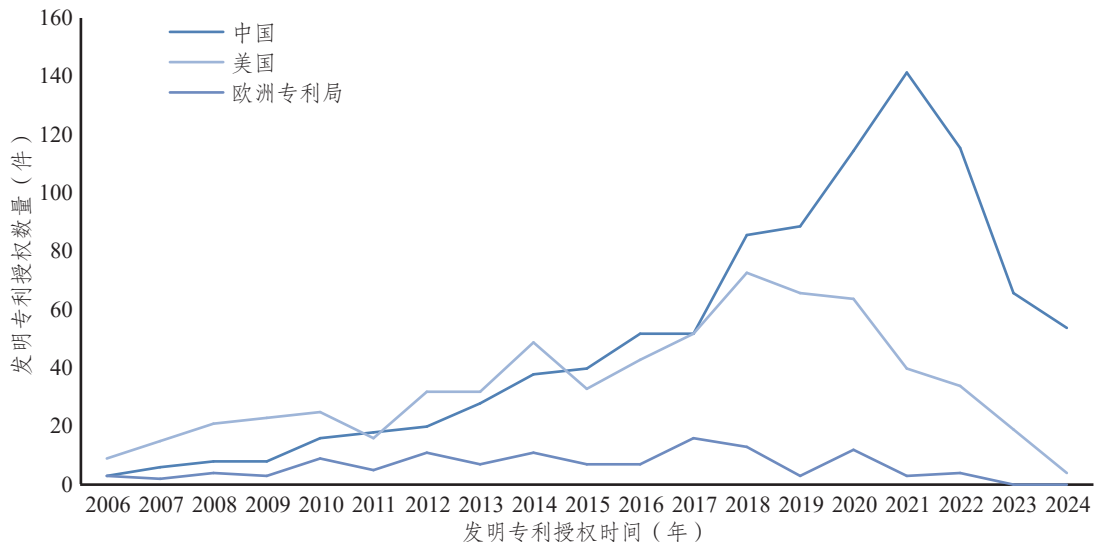


图 2 脑机接口领域相关发明专利的授权趋势

开展“中国脑计划”。第二阶段为2015年至今，中国脑机接口领域的专利数量不断赶超美国，且差距持续拉大，特别是2019年之后，中国脑机接口发明专利申请增长尤为迅速，从2019年的163件迅猛增长至2024年的416件，随之相对应的发明专利授权数量从2019年的89件降低至2024年的54件，而美国则经历了6年的增长期直至2020年（132件）后开始下降，发明专利授权数量也从2020年的64件降低为2024年的4件。中国脑机接口专利数量的增长反映了中国在脑机接口技术的基础研究与应用技术方面取得逐步突破，尤其是在医疗康复、智能设备、神经控制等多个领域的应用创新。这一趋势主要归因于中国政府近年来加大了对人工智能、脑科学等高新技术的政策支持与科研资金的投入，支持龙头企业牵头联合产学研用组成创新联合体，加快人形机器人与元宇宙、脑机接口等前沿技术融合。可以预见，在多元主体的协同创新下，中国脑机接口的技术创新将迎来更高水平的发展阶段。

也要清晰地看到，尽管中国、美国在脑机接口领域的专利数量整体来看呈现快速增长的态势，但自2022年开始以来，以中国、美国、欧洲为代表的三大专利主体均呈现了数量波动或下降的趋势。这表明全球脑机接口的技术创新处于关键核心技术的攻坚突破阶段，技术的可行性和市场需求的应用性也还未完全得到验证。加之脑机接口系统又涉及高精度的植入技术和电子设备，其长期安全性和可靠性至关重要，技术故障或设备失效也对用户的健康构成威胁，使得专利的研发进程受到伦理与安全要求的影响。

3.2 脑机接口技术的应用现状

作为人工智能与脑科学的融合学科，脑机接口经过数年的发展已经逐渐成为电脑通信技术的新领域之一，逐渐应用于医疗健康、交流沟通、生活娱乐等方面。这种技术渗透的广泛性对伦理治理提出了双重挑战：一方面，技术应用场景的差异化将导致伦理风险的异质化分布——医疗场

景中的知情同意问题与消费场景中的认知隐私泄露存在本质区别；另一方面，有效的治理框架构建必须基于对场景特性的深度解构，包括具体技术实现路径、用户群体特征以及人机协同程度等维度参数。只有对技术在不同场景中的实际应用和潜在影响有清晰的认识，才能从实践层面制定出针对性强、可操作的治理措施。基于此，本文根据脑机接口在应用场景中的实施主体、实施对象和应用功能，将当前市场上的脑机接口划分为治疗型脑机接口、服务型脑机接口和增强型脑机接口。

3.2.1 治疗型脑机接口 治疗型脑机接口主要以医院为实施主体，以神经系统疾病的患者为治疗对象，帮助患者恢复或改善因疾病、损伤或先天缺陷而丧失的功能，以个体层面的“能力补齐”为程度要求。近年来，治疗型BCI技术在脊髓损伤、中风、帕金森病等神经系统疾病中的应用取得了重要进展。例如，瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）和洛桑大学医院2022年联合开发了一种脑机接口，通过大脑信号控制机器外骨骼，帮助脊髓损伤患者恢复运动功能，展现出脑机接口在脊髓损伤治疗中的潜力。在之后的两年内，EPFL研究人员不断取得突破，成功开发出高性能、微型脑机接口系统MiBMI，这一技术有望为严重运动障碍患者提供巨大帮助^[26]。随着脑机接口技术的不断进步，预计未来几年，治疗型脑机接口将在神经疾病的早期干预和长期康复方面发挥更大作用，同时也将通过侵入式和半侵入方法实现人机的“物理混合”，以及对人类肢体和语言器官的替代^[27]。

3.2.2 服务型脑机接口 服务型脑机接口以商业企业为实施主体，以大众为服务对象，通过脑机接口技术为用户提供更便捷的日常生活服务，仅以实现群体层面的“生活优化”为限度。近20年来，服务型脑机接口应用以脑电图（EEG）和功能性近红外光学成像（fNIR）等非侵入式BCI为主，较侵入式BCI更具价格优势且便携性更高，应用领域更为广泛，大众接受程度也较高^[28]。例如在智能家居应用方面，服务型脑机接口允许用户通过脑信号直

接控制家电设备,开关灯、调节空调温度或启动咖啡机。在辅助通信应用上,服务型脑机接口能够为严重运动障碍患者(如肌萎缩侧索硬化症患者)提供新的交流方式,通过脑信号控制打字设备或语音合成器,患者能够与他人进行有效沟通。在虚拟现实和增强现实应用上,用户能够通过脑信号直接控制虚拟对象,从而提升沉浸感和交互体验。当前,服务型脑机接口是国内企业短期部署的重点方向,以“非物理融合”和“非心智融合”的方式降低其潜在风险。

3.2.3 增强型脑机接口 增强型脑机接口以政府和企业为主导,主要通过技术手段提升认知、感官或运动功能。目前研究领域集中在军事和后人类领域,以实现人类认知、情感、记忆等心智模式的本质转变、能力跃迁式增强的超人类水平(“人造超人”)为目的^[29]。在认知增强方面,增强型脑机接口可以通过刺激特定脑区或提供实时反馈,帮助用户提升记忆力、学习能力或注意力。在感官和运动能力提升方面,增强型脑机接口与外骨骼或机械臂结合,可以显著增强用户的力量、速度或耐力。这种技术可被广泛应用于军事、工业和体育领域,例如士兵穿戴外骨骼以增强负重能力,或工人使用机械臂完成高强度任务。未来可能在政治角逐和商业利益推动下,“心智融合”的增强型脑机接口将成为脑机融合中长期发展的前沿实验领域。

3.3 脑机接口的产业发展现状

脑机接口技术作为前沿科技领域的重要分支,其发展进程与社会民生、商业格局以及产业规范紧密相连,尤其在医疗和康复领域具有重要应用潜力,其产业化进程正在加速,市场规模持续扩大。根据 Precedence Statistics 的数据,2023 年全球脑机接口市场规模为 23.5 亿美元,预计到 2033 年将增至 108.9 亿美元,2024 年至 2033 年的年均复合增长率为 17.2%。从医疗类市场看,麦肯锡预测,全球脑机接口医疗应用市场规模有望在 2030 年达到 400 亿美元,2040 年达到 1450 亿美元。其中,以中枢神经系统疾病治疗为主的市场

规模 2030 年预计为 150 亿美元,2040 年为 850 亿美元;以情绪评估与干预为主的医疗消费市场规模 2030 年预计为 250 亿美元,2040 年为 600 亿美元^[26]。这一增长主要得益于医疗、研究、心理健康、多行业解决方案和游戏等领域对 BCI 技术需求的增加。然而,在脑机接口的应用过程中,出现技术实际落地难、缺乏行业规范和标准等问题,极大地阻碍了脑机接口产业化发展。本文将从普遍性、商业性、规范性三方面深入探究当前脑机接口应用的主要特征。

3.3.1 脑机接口的应用普遍与民生关系密切 从最初的实验室研究到现在的临床应用,脑机接口正逐渐成为帮助神经系统疾病患者恢复健康、改善生活品质的重要工具,尤其在康复医疗领域,该技术帮助患者恢复部分失去的感知和运动功能,显著提高了他们的生活独立性和自理能力。同时,脑机接口的应用正扩展到教育科技、工业监测、游戏娱乐等多个场景,展现出广阔的前景和社会效益。目前,BCI 市场的规模主要集中在治疗型、服务型和增强型应用场景,且治疗型应用占比最大,服务型和增强型应用逐渐递减。这反映出 BCI 技术在医疗康复领域的关键应用价值,也表明了其在其他民生领域的应用潜力有待开发,也进一步揭示了其与其他民生领域的应用潜力尚未充分释放。随着技术的不断成熟,BCI 有望在更广泛的社会层面产生深远影响,特别是在提升民生福祉方面的作用愈发显著。

3.3.2 脑机接口的商业化过程呈现重投融资轻落地的态势 随着脑机接口技术的不断突破和进步,企业布局脑机接口市场热情高涨。脑机接口产业联盟发布的《脑机接口创新与知识产权研究报告(2023 年)》显示^[30],截至 2023 年第一季度,全球有 1394 起脑机接口相关融资事件,其中中国有 48 起,脑虎科技、应和脑科学、博瑞康等脑机接口公司均获得超亿元融资,诚益通、创新医疗和三博脑科等脑机接口概念潜力龙头股近年来持续拉升。然而,这些进展相对领先的企业缺乏原创性核心技术,研发布局仍相对分散模糊,商业

发展只停留在样机阶段，关键设备零件（尤其是植入式脑机接口）和研究严重依赖进口，靠采用通用生物监测芯片、Matlab 等通用解决方案。

3.3.3 脑机接口产业化的规范标准尚未健全 脑机接口是一个全新的创新类科技产业方向，现有产业政策按照成熟产业来制定管理模式和回报要求，导致政策支持与产业需求错配的情形较多。一方面，脑机类的研究课题和研究方向繁多，涉及多个学科多个领域，但对应的跨学科合作机制尚不完善，科技成果转化仍偏疲软，难以满足产业发展需要的规模和重大产品技术的供给。另一方面，脑机接口技术的伦理和数据隐私问题是公众和监管机构关注的焦点，但中国目前缺乏统一的行业标准和监管政策，难以全面保障技术应用的合法性和安全性，给 BCI 产品的研发、测试和商业化带来极大的不确定性¹。

4 脑机接口技术应用引发的热点伦理问题

基于脑机接口技术在不同应用场景下对神经伦理的挑战各有差异，本文重点选取了天坛医院、脑机接口独角兽企业、电子科技大学三家机构分别作为治疗型脑机接口、服务型脑机接口、增强型脑机接口的调研样本。其中，天坛医院是全国开展脑机接口无线微创项目的权威医院之一，具有较为丰富的脑机接口临床实践、完善的医学伦理审查委员会和专业的临床试验伦理审查流程，能够为本文识别治疗型脑机接口伦理问题提供最

前沿的信息；脑机接口独角兽企业基本具有系统的战略规划布局，与一般企业相比，更能前瞻性地考虑到脑机接口的安全研发及合法的商业化落地，可为服务型脑机接口的伦理问题提供宝贵的行业前沿信息；电子科技大学作为工程伦理领域的高水平高校，拥有卓越的工程伦理专家，可为增强型脑机接口伦理问题提供探索性研究观点。

根据调研访谈的结果（见表 1），总结得出多应用场景下脑机接口面临的热点伦理问题，具体分析如下。

4.1 治疗型脑机接口的热点伦理问题

安全性和有效性是治疗型脑机接口应用中最为关键的伦理问题。天坛医院国家神经系统疾病临床医学研究中心的神经外科医生指出，“安全有效性是当前脑机接口临床试验中首要关注的问题，以侵入式 BCI 为例，它需要在患者的大脑中植入电极，虽然该技术能够直接与神经系统进行交互，但也伴随着显著的风险。侵入式 BCI 可能引发感染、出血等并发症，手术过程中还可能对脑组织造成长期不可逆的损伤。而非侵入式 BCI 虽然避免了大脑手术的风险，但也存在佩戴电极帽的潜在问题。患者需长时间佩戴电极帽，极大可能会引起头痛、发热、视觉模糊等不适症状，且电磁辐射的影响也未完全排除。此外，由于目前大部分侵入式脑机接口技术仍未通过医疗器械的形式审查和技术评审，因此现阶段各大医院伦理委员会面向侵入式脑机接口的人体试验的伦理审查主要围绕安全性进行。”这一观点与传统生命医学伦理原则中的“无害原则”相互吻合，

表 1 多应用场景下脑机接口面临的热点伦理问题

脑机接口类型	应用场景	重要的热点伦理问题	识别来源
治疗型脑机接口	医疗健康领域	安全性与有效性	2024 年 4 月，调研天坛医院国家神经系统疾病临床医学研究中心
服务型脑机接口	游戏、娱乐、教育领域	人格同一性、脑隐私	2024 年 6 月 ~ 9 月，访谈姬械机、强脑科技企业
增强型脑机接口	军事武装、功能增强领域	责任分配、社会公平	2024 年 9 月，访谈电子科技大学工程伦理领域专家

¹ 根据 2024 年 6 月访谈脑机接口产业联盟秘书长和相关脑机接口企业负责人，总结得出当前脑机接口产业发展的现状与问题。

即在医疗过程中需要确保患者的身心健康不会受到伤害^[31]。

然而,从技术的根源来看,脑机接口技术必然涉及对神经疾病患者的干预过程,包括实时监测和解码大脑的电生理信号,指令转化并调控患者的神经信号^[32]。在这一过程中,如何基于有限的大脑信号解码其内在复杂的神经活动和行为,如何在纷繁复杂的大脑信号中排除干扰并精准识别患者的真正意图,以及如何实现患者模糊意图翻译为外置设备的清晰指令等问题,给脑机接口临床应用的安全性和有效性带来了很大的不确定性。

要而言之,如何平衡脑机接口对患者可能带来的不可逆伤害与其潜在益处,已成为该技术研究在治疗型应用场景下无法回避的伦理难题。随着脑机接口技术的不断进展,这些伦理冲突会在一定程度上有所缓解,但侵入式脑机接口所带来的风险问题几乎不可能完全解决。因此,在治疗型应用场景中侵入式脑机接口的临床研究可能很难完全遵循“无害原则”,只能像天坛医院神经外科医生所说“为了发现和控制脑机接口临床应用中的安全问题,研究人员需要做大量的动物试验,积累更加丰富的试验数据,探索更加谨慎的试验流程”。

4.2 服务型脑机接口的热点伦理问题

服务型脑机接口主要应用于新型显示、游戏娱乐、教育学习等领域,从访谈结果获悉,这类应用场景下的脑机接口面临人格同一性、自我真实性、决策自主权和脑隐私等方面的伦理问题。

在教育领域,通过访谈调研强脑科技公司的头戴式设备的脑机接口项目,其负责人表示,“头戴式监测设备已经可以用于实时监测学生的学习状态和专注程度,可以大大提高学生的学习效率,但也出现了教育专家担忧这种设备在一定程度上侵犯了学生的自主性和隐私等质疑的声音。因为这种设备一旦佩戴就能实时监控学生的学习过程,这可能导致他们感到被监测和控制,限制了他们的自主思考和行为选择”。在游戏娱乐领域,

姬械机科技公司的负责人表示,“我们公司发布的‘以梦为马—Dreamgear 绘梦仪’产品,可以实现梦境的记录与梦境图像重建,发现自己的梦境故事,探寻大脑意识深处的奇妙世界。从市场调研来看绝大多数人愿意尝试,小部分人担心设备操纵自己的意识会带来“控脑”的风险并暴露太多的个人脑数据。我个人认为这种担忧是当前新科技产品上市都会面临的用户心理挑战,就像现在市场上虚拟现实游戏《Awakening》,也面临着玩家担心会不会在虚拟世界沉溺的问题。但作为非侵入式的脑机接口产品,身体层面的安全问题可以绝对放心,至于对玩家的心理影响,我们也在通过持续优化算法,守好底线原则”。这也表明,当脑机接口成为用户大脑与外部世界进行交互的中介时,不可避免地会面临保障用户意识安全的风险。

这些风险问题无疑对传统生命医学伦理中的“尊重自主性原则”提出了挑战,即无法确保用户能够自主地决策自己的思想和行为^[33]。在服务型脑机接口应用中,脑机接口需要向大脑及时反馈外部设备实现用户主观意图的结果,也需要将外部环境中的一些重要信息传输给大脑,这种交互被用来增强用户服务的体验感和沉浸感。但事实上,在交互过程中,脑机接口对用户意识具有强大的干预与控制能力,能够引发用户心理上的自我身份转变和技术的依赖^[34]。不同于其他技术的是,脑机接口能够精准捕捉到用户的心理活动,这使得商家或不法分子可以在没有用户知情的情况下,影响其决策和行为,甚至改变其情感和思维方式,这种情况对个体的决策自主权和心理健康构成了极大的威胁。当前,尽管脑机接口技术各个领域取得了一定进展,但在确保用户自主权和心理健康方面的伦理框架尚不完善。如何制定有效的伦理规范,防止脑机接口技术对个人自主性和隐私的侵犯,仍是需要解决的关键问题。

4.3 增强型脑机接口的热点伦理问题

责任分配是增强型BCI面临的核心问题之一。脑机接口设备可能存在故障或脑信号解读错

误的风险，这些技术故障可能导致用户行为产生非自主的负面影响。基于深度访谈，电子科技大学工程伦理专业的教授聚焦增强型脑机接口的伦理问题，指出“在增强型脑机接口应用中，一旦设备出现问题，可能导致用户做出不当指令，做出危及生命的行为。如果要探讨责任的归属问题，就变得十分复杂了，究竟是设备制造商、技术提供者，还是用户自身应当承担责任？目前，中国现行法律法规体系还没有明确规定在BCI技术故障或误解读所导致的行为后果中的责任分配和赔偿机制，导致在此类事件发生时难以有效追责”。对于这一问题，斯蒂芬·雷尼等认为，身体与脑机接口在个体使用中的作用存在差异。例如，在进行“接球”动作时，身体行为是“目标导向”的，注意力集中在球上；而脑机接口行为则是“控制导向”的，使用者的注意力集中在如何操作设备^[35]。这种差异导致当脑机接口用户引发事故时，其责任认定通常比直接行为引发的事故更复杂。目前学界争议的核心在于：如何在用户责任、脑机接口设备缺陷责任之间划分明确比例，而非简单判断是否承担全部责任。如果责任归属问题得不到有效解决，脑机接口可能会引发更多社会问题。

增强型BCI在社会公平方面的问题也不容忽视。电子科技大学教授在访谈中还指出，“脑机接口技术的发展还将引发资源分配公平性问题。由于脑机接口的成本较高，只有少数经济条件较好的人群能够负担得起，技术的应用主要集中在富裕阶层，从而加剧贫富差距和社会分化。特别是在教育和医疗领域，BCI技术可能为少数使用者提供巨大优势，而未能使用的人群则可能被进一步边缘化，形成新的社会不公平现象”。这种观点的探讨，在一定程度上表明，脑机接口作为新兴交叉技术已不能适用传统的伦理规范约束。已有关于传统伦理原则的讨论，通常采取个体主义的立场与诉诸直觉的研究进路^[36]，较少关注伦理理论与道德实践之间的关系。这种局限性可能导致对技术发展中权力结构和社会不平等问题的忽视。

可以预见增强型脑机接口的应用将会随着技术的进步拥有更加广泛的应用，我们也更加需要关注其社会影响，确保技术进步能够惠及更广泛人群。

5 脑机接口技术应用伦理问题的根源分析

基于对脑机接口技术发展阶段、产业发展现状和潜在的热点伦理问题，本文进一步剖析当前脑机接口伦理治理实践中的现存问题与现实挑战，主要包括脑机接口治理过程中的顶层设计缺乏、应急能力不足、治理效能不高、全球协作有待完善等方面。这些现实挑战反映出当前脑机接口伦理治理体系中对灵活性、动态性、开放性的关注不足，亟需加强脑机接口伦理治理，以应对当前的领域内问题。

5.1 脑机接口应用伦理治理中的顶层设计缺乏

顶层设计在中国的科技治理体系中发挥着关键的引领、统筹和规范作用，通过政策制定、体系建设、法律规范、监督执行和国际合作等多方面的努力，确保脑机接口技术发展应用在安全、合规、可控的框架下进行，将为脑机接口的技术和伦理的协调发展奠定基础。

当前，脑机接口的治理体系呈现显著的碎片化特征，缺乏系统性的战略顶层设计，导致技术迭代速度与伦理规范效能之间形成结构性张力。现有脑机接口政策法规多依附于传统医疗设备或数据安全体系，例如《医疗器械监督管理条例》虽可规范部分医疗类脑机接口，但对意识干预、神经增强等颠覆性应用存在本质性不适配——神经信号解码精度的纳米级突破可能瞬间改变技术伦理属性，而静态监管标准无法动态捕捉这种量变引发的质变风险。更根本的矛盾在于治理主体的权责模糊化，科技部、卫健委、网信办等机构尚未建立常态化协同机制，面对神经数据主权归属、人机混合体法律身份等新型议题时，往往陷入多头监管与治理真空的悖论性困局。

行业标准体系的建设滞后也进一步放大了治

理裂痕。全球范围内既未形成神经数据的分类分级共识,也缺乏意识可读性技术的安全评估范式,这使得不同厂商的脑电信号采集设备在数据精度、存储协议、共享规则等方面存在显著差异。当侵入式脑机接口企业推进人体试验时,传统医疗伦理审查体系难以有效识别神经链路重构可能引发的认知异化风险,类似 Neuralink 动物试验暴露的脑组织损伤问题已警示现行标准的前瞻性不足。更深层的危机在于价值引导机制的缺失,技术研发缺乏对认知鸿沟扩大、人类主体性消解等文明级风险的制度性约束,私营企业主导的技术路线可能将脑机接口推向增强特权阶层认知能力的危险方向。当技术发展轨迹与治理框架的代差持续扩大,系统性伦理危机将不可避免地由理论推演转化为现实威胁。

5.2 脑机接口应用伦理治理中的应急能力不足

应急能力是检验和评价治理主体治理能力的重要因素,脑机接口伦理治理中的应急能力主要是指在面对伦理突发事件时能够及时、灵活、动态、开放地做出回应和决策。

当前脑机接口治理体系在应对突发性伦理风险时可能暴露出三重关键缺陷:其一,风险识别与响应机制存在严重滞后性。传统医学伦理审查框架依赖静态技术评估标准,难以动态捕捉脑机接口快速迭代中涌现的新型风险,例如侵入式 BCI 设备神经信号解码精度的突破可能瞬间改变意识干预的潜在强度,而现有监管体系尚未建立与之匹配的动态预警阈值。其二,跨学科应急决策能力存在结构性短板。面对神经数据异常泄露、闭环系统算法失控等突发事故,监管部门缺乏兼具神经科学、人工智能与伦理学复合背景的专家团队,导致风险评估与处置决策常陷入“技术黑箱”困境。其三,跨境风险传导缺乏协同屏障。当脑机接口技术滥用引发的意识操控、神经武器化等危机突破国界时,国际社会不仅缺乏类似核技术管控框架的全球应急响应公约,更未建立针对神经数据主权跨境争议的紧急仲裁制度,

这种国际治理真空使区域性伦理危机极易升级为全球性灾难。贺建奎基因编辑事件作为前车之鉴,深刻暴露出新兴技术领域风险应急机制的脆弱性——当科研行为突破伦理红线时,现有治理体系既缺乏快速识别风险的预警机制,更缺少有效遏制技术滥用的强制手段。在这一事件中,非常规技术操作在伦理审查流程中未被有效拦截,暴露传统伦理监督框架对突破性技术突变存在的响应迟滞。这种制度缺陷在脑机接口领域更为致命,当受试者出现不可逆神经损伤或自主意识紊乱时,既无标准化应急处置流程,也缺乏跨机构协同救治体系,这种系统性脆弱性可能直接动摇公众对新兴技术的基本信任。

5.3 脑机接口应用伦理治理中的实际效能不高

治理效能是治理体系建设的关键指标之一,提升脑机接口伦理治理效能更是其治理体系建设的根本目的和价值旨归。脑机接口技术应用的伦理治理正陷入“纸面规范”与“现实失控”的效能困境,其治理框架与技术新闻的脱节日益凸显。

现有的脑机接口伦理审查机制多停留在形式化和程序化层面,缺乏对技术应用全过程的有效监督。传统医疗伦理评估标准难以穿透脑机接口技术的复杂性。以侵入式设备人体试验为例,审查委员会往往聚焦于物理性损伤风险评估,却对神经可塑性改变引发的认知偏移、自主意识弱化等深层影响缺乏有效监测工具。尤其在服务娱乐性领域的应用,一些非医疗性质的 BCI 产品在市场推出时,可能并未进行充分的风险评估,尚未经过严格的伦理审查程序,导致潜在的伦理风险转移扩散至市场中,直接影响到用户的隐私、心理健康等方面。尽管中国已出台《个人信息保护法》等相关法规,但针对脑机接口技术的伦理规范仍显薄弱,尤其在数据隐私保护方面,技术应用的监管滞后。此外,脑机接口伦理治理中的责任落实存在较大缺陷,在实际操作中,违规行为的追责归因无法可依,判定边界模糊,追责力度

不足等问题显著，更是缺乏有效的监督和惩戒机制来维持脑机接口应用的良好秩序。一些脑机接口技术的生产商和应用方在遭遇伦理争议时，往往仅停留在事后补救和赔偿，未能从根本上遏制伦理风险的发生。这种监管漏洞使得伦理治理的实际效果大打折扣，无法形成有效的制度约束。

5.4 脑机接口应用伦理治理中的全球协作尚处于起始阶段

当前，随着全球化进程不断推进，脑机接口伦理治理的全球协作也日益变得重要，而目前全球还没有哪个国家对脑机接口的技术标准和安全标准给出明确、系统的政策法规，相关国际组织还处在脑机接口伦理规范的呼吁倡议层面。自2019年来，国际组织和科学机构就脑机接口技术发表了203份会议文件。联合国教科文组织成立了神经伦理特设专家组，就“脑机接口技术的医疗和非医疗应用、研究和临床试验、神经技术与人工智能和数字技术的相互作用、平等获取技术惠益以及技术风险方面的问责和治理”等展开广泛辩证，并计划于2025年发布《神经技术伦理建议书》。¹

脑机接口技术的伦理治理面临着跨文化的复杂性，全球范围内缺乏统一的伦理标准和法律框架。目前，虽然国际上已有一些相关的伦理建议，例如欧洲伦理委员会发布的关于神经科学技术的伦理建议，但这些准则多局限于特定领域或地区，未能形成覆盖全球的统一标准。一方面，各国的伦理立法进程存在差异，导致治理体系的不一致。在脑机接口技术的伦理治理中，不同国家在对待隐私保护、数据使用、知情同意等问题上采取了不同的立场。例如，欧盟的《通用数据保护条例》（GDPR）为保护个人数据提供了严格的法律框架，而一些发展中国家对数据隐私的法律保障尚不完善。另一方面，跨国合作的缺乏加剧了全球伦理治理的困难。在脑机接口技术的研发和应用

过程中，科研机构、技术公司和政府之间的合作尚不紧密，导致了技术监管和伦理监督的盲区。虽然一些国际组织和学术团体，如国际脑研究组织（IBRO）、神经科学与脑机接口协会（NABIC），已经开始探索BCI技术的伦理治理框架，但大多数国家的参与仍然局限于局部或单一领域，全球性的合作机制尚未形成。

6 脑机接口技术应用伦理考量与治理建议

脑机接口伦理问题相较于一般生命医学伦理，更侧重于技术深度介入人体后产生的精神与物质、人类与技术边界模糊等新型伦理挑战，以及神经数据隐私、心智干预界限、认知增强限度等复杂议题，本文在此基础上，提出以下脑机接口技术应用的伦理治理建议。

一是深化跨学科合作，前瞻研判风险。脑机接口作为一个多学科交叉的研究领域，不同领域对于脑机接口的关切点不尽相同。一方面，推动技术治理对话和多边协作参与，积极鼓励神经科学家、工程师、伦理学家、法律专家、社会学家等多学科背景的专业人士共同参与讨论，从不同角度审视脑机接口技术的应用前景及其潜在的社会影响。另一方面，构建技术风险评估体系，鼓励跨领域对话，搭建多方协作网络，积极开展持续的全过程、多元化、介入式的建构性技术评估，以前瞻性的评估布局适应技术的快速迭代。

二是推动脑机接口伦理标准和规范制定，为产业化发展提供有效指引。脑机接口技术的快速发展已经超出了传统治理模式的适应速度，迫切需要制定和完善标准规范以确保技术的健康发展。在此过程中，要推进科技界与产业界紧密结合，鼓励企业、科研机构积极参与信号采集、数据处理、信息输出及产品测评等基础标准的研究，重点关切安全有效、隐私保护、尊重自主等多方

¹ 数据来源于截至2024年12月31日，统计获取的联合国教科文组织官网已公布的神经伦理和脑机接口伦理治理相关的会议文件，并就以上文件中重点涉及脑机接口伦理问题的内容进行具体分析。

面的道德标准;同时发挥行业协会等科技社团在行业标准制定中的作用,促进产学研用紧密协作,共同推动脑机接口技术的规范化、标准化发展。

三是加强监督管理,完善治理体系。一方面,加强脑机接口伦理审查,引导研究人员和开发者按照伦理审查的要求设计和开发脑机接口,完善医学伦理委员会对脑机接口项目审批的运行机制,在确保伦理审查质量的前提下,积极推动脑机接口审查结果互认机制的建立。另一方面,推进脑机接口治理法治进程,对于各种脑刺激意外后果发生的情形,应通过法律途径明确规定制造商、生产商和用户之间的责任归属,避免脑机接口普及后可能带来的各种法律问题。

四是参与国际标准制定,争夺国际话语权。首先,积极参与国际标准化组织及其他国际平台(如ISO、IEEE)的工作,推动国内科研机构和企业参与全球脑机接口领域相关标准的制定,通过在标准化过程中提出具有创新性的技术方案,争取在全球标准中占据主导地位。其次,加强与国际顶尖科研机构、企业的合作与交流,推动跨国技术合作与联合研发,提升中国在全球脑机接口科研网络中的地位。最后,加强国际宣传和品牌建设,通过国际媒体、学术期刊、专业网站等渠道,广泛宣传中国在脑机接口领域的研究成果和创新实践,提高中国在国际脑机接口市场的竞争力和话语权。

责任编辑:梁思琪 校对:梁思琪 刘晓莉

参考文献

- [1] O'Doherty J E, Lebedev M, Hanson T L, et al. A brain-machine interface instructed by direct intracortical microstimulation[J]. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 2009, 3: 20.
- [2] Wolpaw J R, Birbaumer N, McFarland D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2002, 113(6): 767-791.
- [3] Milekovic T, Sarma A A, Bacher D, et al. Stable long-term BCI-enabled communication in ALS and locked-in syndrome using LFP signals[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2018, 120(17): 343-360.
- [4] Gallegos-Ayala G, Furdea A, Takano K, et al. Brain communication in a completely locked-in patient using bedside near-infrared spectroscopy[J]. *Neurology*, 2014, 82(21): 1930-1932.
- [5] Kapgate D. Efficient quadcopter flight control using hybrid SSVEP+ P300 visual brain computer interface[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2022, 38(1): 42-52.
- [6] Zhong S S, Liu Y D, Yu Y, et al. A dynamic user interface based BCI environmental control system[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2020, 36(1): 55-66.
- [7] Klein E. Informed consent in implantable BCI research: identifying risks and exploring meaning[J]. *Science and Engineering Ethics*, 2016, 22(5): 1299-1317.
- [8] Glannon W. Ethical issues with brain-computer interfaces[J]. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 2014, 8: 136.
- [9] 肖峰. 脑机接口的价值权衡: 风险与收益之间[J]. *中州学刊*, 2023(7): 104-111.
- [10] 肖峰. 脑机接口技术的发展现状、难题与前景[J]. *人民论坛*, 2023(16): 34-39.
- [11] 顾心怡, 陈少峰. 脑机接口的伦理问题研究[J]. *科学技术哲学研究*, 2021, 38(4): 79-85.
- [12] 周程. 脑机接口领域中的伦理问题研究[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2024(16): 44-55.
- [13] 李超, 缪航, 王振宇. 脑机接口技术重点领域应用及其社会影响[J]. *科学与社会*, 2024, 14(3): 41-56.
- [14] 杨庆峰. 脑机接口、生命形式与同一性[J]. *东华大学学报(社会科学版)*, 2024, 24(2): 26-31.
- [15] 杨雨, 王国豫. 植入式脑机接口论域下的

“同一性危机”与伦理争议[J]. 哲学动态, 2024(4): 80-89, 129.

[16] 崔中良, 朱晨恩. 当前我国脑机接口技术的伦理进展与治理应对[J/OL]. 中国医学伦理学, 1-12 [2025-03-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1203.R.20240906.1704.002.html>.

[17] 张晟婕, 赵长丽, 宁伟程, 等. 脑机接口技术的伦理风险及应对措施[J]. 中国医学伦理学, 2024, 37(1): 61-68.

[18] 陶应时, 陈巧, 刘红玉. 治疗型脑机接口的知情同意问题及其应对[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2023, 24(1): 62-68.

[19] 张志领, 王高峰. 脑机接口用户的责任伦理研究——基于控制的视角[J]. 科学技术哲学研究, 2023, 40(4): 94-99.

[20] 张喆, 赵旭, 马艺昕, 等. 脑机接口技术伦理规范考量[J]. 生物医学工程学杂志, 2023, 40(2): 358-364.

[21] 王高峰, 张志领. 脑机接口隐私风险治理[J]. 科技管理研究, 2022, 42(5): 204-209.

[22] 王高峰, 张志领. 算法伦理视域下的脑机接口伦理问题研究[J]. 自然辩证法研究, 2022, 38(7): 68-73.

[23] 叶岸滔. 脑机接口技术的风险评价与应对研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2021, 13(1): 27-34.

[24] 张学义, 潘平平, 庄桂山. 脑机融合技术的哲学审思[J]. 科学技术哲学研究, 2020, 37(6): 76-82.

[25] 李佩瑄, 薛贵. 脑机接口的伦理问题及对策[J]. 科技导报, 2018, 36(12): 38-45.

[26] 肖松, 程和平, 吴朝晖, 等. 脑机接口技术

发展现状及未来展望[J]. 科学与社会, 2024, 14(3): 2-25.

[27] Wang A X, Tian X, Jiang D, et al. Rehabilitation with brain-computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: a randomized controlled trial[J]. *Med*, 2024, 5(6): 559-569. e4.

[28] 杨榕, 王倩, 訾阳, 等. 近10年脑机接口技术用于康复医学领域的可视化分析[J]. 中国康复理论与实践, 2024, 30(4): 416-423.

[29] 刘亚东, 李明, 周宗潭. 脑机接口技术的军事应用前景及其挑战[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(11): 1991-2001.

[30] 脑机接口产业联盟. 脑机接口创新与知识产权研究报告[R]. 北京: 脑机接口创新发展论坛, 2023.

[31] 理查德·A. 斯皮内洛. 世纪道德: 信息技术的伦理方面[M]. 刘钢, 译. 北京: 中央编译出版社, 1999: 53-54.

[32] 曾雄. 脑机接口技术的三位一体规制框架构建[J]. 西安财经大学学报, 2025, 38(1): 84-93.

[33] 刘时雨, 马靖茹, 王明旭. 2024版《赫尔辛基宣言》的修订及启示[J/OL]. 中国医学伦理学, 1-17. [2025-03-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1203.R.20241226.1349.014.html>.

[34] 肖峰. 脑机接口介导的心物交互及其哲学意义[J]. 科学技术哲学研究, 2024, 41(5): 1-8.

[35] Gilbert, Cook M, O'Brien T, et al. Embodiment and estrangement: results from a first-in-human “intelligent BCI” trial[J]. *Science and Engineering Ethics*, 2019, 25(1): 83-96.

[36] 肖峰. 从技术伦理到脑机接口伦理[J]. 自然辩证法研究, 2023, 39(8): 63-68.

A Study on hot ethical issues of brain–computer interface in multiple application scenarios

Zheng Yunrui, Xia Ting

(Institute for Innovative Evaluation, National Academy of Innovation Strategy, Beijing 100038, China)

Abstract: As a transformative human–machine interaction technology, brain–computer interface (BCI) is emerging as a strategic frontier in future industries and technological competition among major global powers. China's 14th Five–Year Plan designates brain science and brain–inspired research as national strategic scientific and technological fields, actively promoting breakthroughs and the translation of BCI technologies. To better understand the development and application of this technology, identify and anticipate its ethical risks, strengthen ethical governance, and promote the responsible use of science and technology, this study conducted some surveys and interviews on the hot ethical issues of BCI in multiple application scenarios. Based on the findings, it comprehensively outlines the key ethical issues of brain–computer interfaces in different application scenarios. Specifically, therapeutic BCI primarily raises concerns related to safety, efficacy, and informed consent; service–oriented BCI involves ethical challenges regarding personal identity and authenticity, decision–making autonomy, and neuroprivacy; and enhancement BCI presents issues of responsibility allocation and social fairness. In response to these ethical concerns, this study proposes relevant governance recommendations.

Keywords: brain–computer interface; technological application; technology ethics; technology governance